

文章编号: 0253-2239(2010)03-0655-05

# 基于荧光机理的光纤温度测量仪

王玉田 胡俏丽 石军彦

(燕山大学测试计量技术及仪器河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要** 基于普朗克定律的荧光光纤测温仪,采用蓝宝石光纤作为温度探头,蓝宝石光纤物理化学性能稳定,熔点高(超过 2000 °C),在 0.3~0.4 μm 波段范围内透光性好,具有光波导的特点,在温度光纤传感和近红外传感等领域有很好的应用前景。利用快速傅里叶变换的拟合方法对荧光寿命进行测量,从第一个非零相的相位角的正切值得出被测的荧光寿命,具有速度快,误差小,不受本底干扰等优点,提高了测量的分辨率。测量范围为 0 °C~450 °C,分辨率达到 0.4 °C。实验表明该测温仪能有效地消除光源不稳定及测量通道中光强变化对测量结果的影响,具有抗电磁干扰强,测温准确,分辨率高等特点。

**关键词** 光纤光学;荧光温度计;快速傅里叶变换;蓝宝石光纤

**中图分类号** TP212.14 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20103003.0655

## Optical Fiber Thermometer Based on Fluorescence Mechanism

Wang Yutian Hu Qiaoli Shi Junyan

(Hebei Provincial Key Laboratory of Measurement Technology and Instrumentation, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

**Abstract** Fluorescence optic-fiber temperature sensor based on Planck law is studied by using sapphire fiber as thermal probe. With a high melting point, over 2000 °C, high transmissions in the wave band of 0.3~0.4 μm and favorable mechanical and chemical inert, sapphire fiber is very attractive for high temperature optical fiber sensor and near infrared energy delivery. The measured fluorescence life time can be obtained by calculating tangent value of first non-zero phase angle and using fast Fourier transform to measure the life time of fluorescence. This method has virtues such as fast speed, small error and no background interference. In the detection range from 0 to 450 °C, the thermometer has an average temperature resolution of 0.4 °C. The experimental results show that this system can effectively decrease the influence of instability of light source and intensity variation in measuring channel on results. The system has advantages of high accuracy, very high temperature resolution, good dynamic response and immunity to the electro-magnetic interference.

**Key words** fiber optics; fluorescence thermometer; fast Fourier transform; sapphire optical fiber

## 1 引言

温度是测量科学和工业过程控制中最重要的几个测量参数之一,由于温度测量的应用范围不断扩展,使得对温度监控的创新、研究和发展一直在进行<sup>[1]</sup>。这些测量环境为温度的准确测量提出了各种要求,如被测目标可能极端有害,也可能是运动的,或接近被测目标十分困难,甚至探头和被测目标无法接触,或者存在电磁噪声的干扰等。因而要寻求具有可靠性高、绝缘性能好、抗电磁干扰、重复性好、

响应速度快、体积小、且价格低廉等优点的新型温度传感器。对于这样的要求,具有电特性温度测量装置的热电偶、电热温度调节器等是不完全适合的。由于光纤绝缘性好,耐高温,荧光光纤传感器可以工作在强电磁场、高温、腐蚀、高压以及有爆炸危险性的恶劣环境中,可以实现非接触测量,对被测对象不产生影响,因而基于光导纤维的测温技术成为最活跃的研究与开发领域之一<sup>[2]</sup>。本文介绍了一种基于蓝宝石光纤的荧光光纤测温系统,蓝宝石光纤具有

收稿日期: 2009-08-10; 收到修改稿日期: 2009-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(60974115)资助课题。

作者简介: 王玉田(1952—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: y. t. wang@163.com

优良的物理化学性能,高达 2045 ℃ 的熔点,在近红外具有良好的光学透过率,是优良的耐高温光纤传感材料,适用于各温度测量的场合。

## 2 荧光测温基本原理

根据普朗克定律,当物体接收到某种形式的能量,最终都会产生电子在能级之间的跃迁过程并伴随着光波发射

$$hc = \lambda(E_2 - E_1), \quad (1)$$

式中  $E_2$  和  $E_1$  分别为电子在高和低能级时的能量 ( $E_1 < E_2$ ),  $h$  为普朗克常数,  $c$  为光速,  $\lambda$  为发出光子的波长。

实际上,  $E_1$  和  $E_2$  分别位于两条能带之中,所以观测到的不是某一波长的光,而是某一波段的光,这就是发光的基本原理。根据激励方式的不同,又可分为光致发光、阴极发光、场致发光等。荧光测温的工作机理是建立在光致发光这一基本物理现象上的<sup>[3]</sup>。所谓光致发光,就是当某些材料由于受到紫外、可见或红外区内的某种形式的电磁辐射的激发所产生的超热辐射以外的发光现象。这种发光是材料吸收入射光子所获得的那部分能量的释放形式。它既可能是荧光也可能是磷光,或者两种皆有。所有荧光材料的荧光寿命和荧光强度,都会在某一相应的温度范围内表现出一定的温度相关性。这些温度相关性就是荧光测温法之工作机理所在。

荧光光纤温度传感器有 3 种形式:强度型,强度比型和寿命型<sup>[4]</sup>。强度型传感器受光源和光纤弯曲损耗的影响精度不高;强度比型传感器虽然对强度型传感器有改进,但电路相对复杂,必须有参考通道;荧光寿命型传感器不受光源和探测器的退化以

及光纤弯曲的影响,荧光寿命是荧光衰减的本征参数,传感器的探头修正容易,不需要对单个探头做修正,所以采用荧光寿命型温度传感器<sup>[5]</sup>。

## 3 测量系统整体结构

根据荧光的温度特性,结合温度测量仪器的小型化、智能化、模块化和便携式的发展趋势,设计了具有紧凑高效的光学系统与整机结构的荧光光纤温度测量系统。本系统采用双光路双通道测量方式,总体设计方案如图 1 所示。将端部掺  $\text{Cr}^{3+}$  的蓝宝石光纤一端经光学抛光以后用作温度传感头,另一端与 Y 型石英光纤相接。将一个脉冲驱动的黄绿色超高亮度发光二极管(LED)作为激励光源(发光中心波长约为 575 nm,光谱带宽为 40 nm),光源发出的光经透镜聚焦后进入 Y 型石英光纤激励  $\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$  晶体发射荧光,激发的荧光从 Y 型石英光纤另一端导出。由探头发出的光经耦合器后分成两部分,一部分为参考光,经光纤传输、光耦合器、测量光纤光栅滤波器和光电转换后作为参考信号,监测激发光的强度,以消除激发光强度对测量结果的影响。另一部分经光纤、光耦合器、参考光纤光栅滤波器、光电探测、光探测器输出的信号经放大后由荧光信号处理系统处理,计算荧光寿命并由此得到所测温度值。振荡器输出的脉冲信号用来驱动 LED 光源和锁相检测的方波信号。被测样品的荧光信号幅度都较弱,采用双参考信号的检测技术提取荧光信号,该技术对激励光的泄露具有很好的抑制作用,实现了在没有激励光信号影响下的荧光寿命的测量,提高了测量精度。

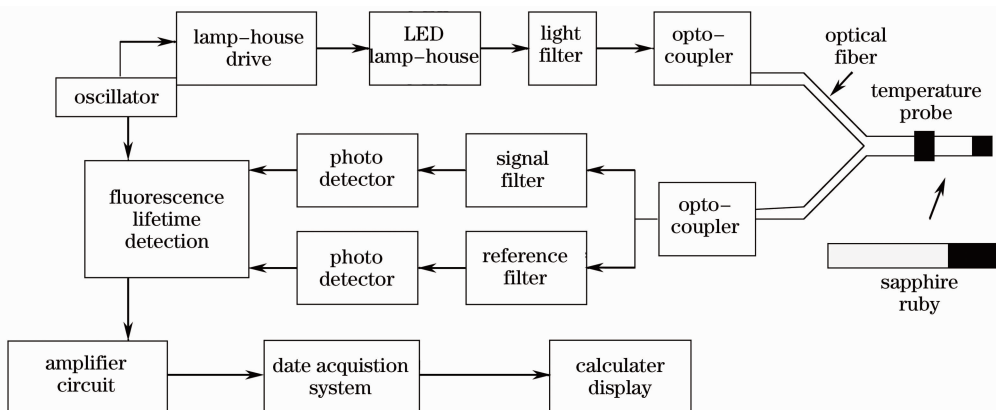


图 1 测量系统结构

Fig. 1 Scheme of measurement system

## 4 蓝宝石光纤温度探头

通常的石英光纤荧光温度传感头,由于荧光感温元件与传导光纤束的分离,必须采用光学胶合剂及较复杂的外保护套以增加机械强度和稳定性,这使得传感头的热惯性增大,动态响应变差。同时,由于部分石英光纤必须经受荧光体的工作温度,往往导致采用昂贵的金属镀层的石英光纤,很难适用于温度较高场合。蓝宝石光纤具有优良的物理化学性能,高达 2045 °C 的熔点,在近红外具有良好的光学透过率<sup>[6]</sup>,是优良的耐高温光纤传感材料。我们用激光加热小基座(LHPG)法,在蓝宝石光纤端部生长一小段红宝石( $\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ )晶体光纤等荧光感温材料,制成结构紧凑、耐高温和性能稳定的蓝宝石荧光光纤温度传感头,对传感头的荧光温度特性进行了研究,进而制得蓝宝石光纤荧光温度计。

作为感温元件的荧光发射体必须满足:具备良好的物理化学性能,易于实现在合适波段的光抽运和强荧光发射,确定的荧光温度特性和简明的时间衰减特性,在要求的测温区间具有相对较长的荧光寿命,这样可以避免采用昂贵的高速信号处理电路以降低测温装置成本。目前用作荧光发射体的主要有各类掺杂的单晶体,如  $\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$  和钕铝石榴石( $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ )等<sup>[7]</sup>。端部掺  $\text{Cr}^{3+}$  的蓝宝石光纤采用 LHPG 法生长,如图 2 所示,先以蓝宝石棒为源棒、蓝宝石光纤为籽晶,根据需要生长长度达 50 cm,直径为 200~1000  $\mu\text{m}$  各种规格的蓝宝石光纤,然后以其作为籽晶,用  $\text{Cr}^{3+}$  掺杂浓度合适的  $\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$  晶体圆棒作为源棒,在蓝宝石光纤上再生长一段  $\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$  光纤。生长过程中,严格控制激光加热功率和源棒及籽晶的提拉速度,保证光纤掺杂段和非掺杂段具有良好的过渡,使得蓝宝石光纤和  $\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$  光纤的结合部具有较好的机械强度和较低光学损耗。同时,还必须控制  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  的

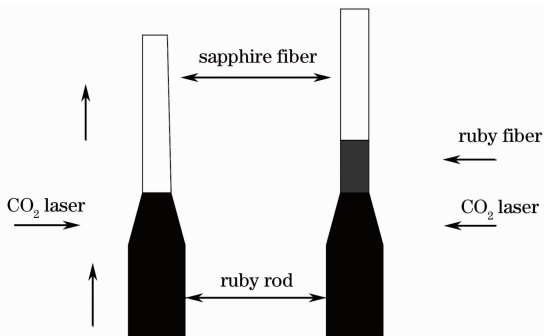


图 2 端部掺  $\text{Cr}^{3+}$  的蓝宝石光纤生长

Fig. 2 Growth of end doped  $\text{Cr}^{3+}$  sapphire

挥发, $\text{Cr}^{3+}$  的质量分数以控制在 0.1% 左右为好。 $\text{Cr}^{3+}$  浓度太低,荧光信号太弱,浓度太高容易引发荧光的自吸收。

## 5 荧光寿命的检测

荧光寿命的传统测量方法主要有 3 种:数据拟合法、模拟锁相法、数字锁相法<sup>[8]</sup>。其中数据拟合法既可以测量荧光寿命,又可以对信号进行多重分析。荧光寿命测量的数据拟合法主要有 Marquardt 方法、Prony 方法、对数拟合(log-fit)方法等<sup>[9]</sup>。为提高测量结果的信噪比,需要一种更有效的拟合方法。根据荧光信号为单指数衰减信号的特点,首先对这种信号进行傅里叶变换,然后从变换后的非零次频谱项中计算出荧光寿命。

在激励光停止后,荧光不会马上消失,而以指数规律衰减。荧光消退的时间称为荧光寿命  $\tau$ <sup>[10]</sup>。荧光寿命  $\tau$  是温度的函数,与光强无关。荧光衰减信号可以表示为

$$f(t) = A \exp(-t/\tau) + B, \quad (2)$$

式中  $A$  为起始光强; $B$  为由于黑体辐射或电路的暗电流带来的本底噪声。对信号进行数字采样时,可得

$$f_k(t) = A \exp(-K\Delta t/\tau) + B, \quad k = 0, 1, \dots, N-1. \quad (3)$$

式中  $\Delta t$  为数据采样时间间隔。可以对该信号进行拟合,得出荧光寿命  $\tau$ 。

本研究给出了一种新型的荧光寿命拟合方法,首先将形如(2)式的函数进行快速傅里叶变换(FFT),然后根据其傅里叶频谱的第一个非零项得出荧光寿命。该方法计算迅捷、精度高、不受本底信号影响。具体推导和结果如下:

(2)式傅里叶变换的第  $n$  项为

$$F_n = \sum_{k=0}^{N-1} f_k \exp\left(-j \frac{2\pi n k}{N}\right) = \sum_{k=0}^{N-1} A \exp\left[-\left(\frac{\Delta t}{\tau} + j \frac{2\pi n}{N}\right)k\right] + B \sum_{k=0}^{N-1} \exp\left(-j \frac{2\pi n k}{N}\right), \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (4)$$

其中  $j$  为单位坐标矢量。0 次项为

$$F_0 = A \frac{1 - \exp(-N\Delta t/\tau)}{1 - \exp(-\Delta t/\tau)} + NB, \quad (5)$$

与本底信号  $B$  有关。而其他项( $n \neq 0$ )可以化简为

$$F_n = A \frac{1 - \exp(-N\Delta t/\tau)}{1 - \exp(-\Delta t/\tau) \exp(-j2n\pi/N)}, \quad (6)$$

对于  $n=1$  项可以化为

$$F_1 = A \frac{1 - \exp(-N\Delta t/\tau)}{[1 - \exp(-\Delta t/\tau)]\cos(2\pi/N) + j\exp(-\Delta t/\tau)\sin(2\pi/N)}. \quad (7)$$

除 0 次项外,其余各项皆与本底信号无关,采用第一个非零项来计算荧光寿命。对傅里叶变换结果的  $n=1$  项其幅角值取正切函数为

$$\phi_1 = \tan\varphi_1 = \frac{\text{Im}F_1}{\text{Re}F_1} = \frac{-\exp(-\Delta t/\tau)\sin(2\pi/N)}{1 - \exp(-\Delta t/\tau)\cos(2\pi/N)}. \quad (8)$$

可见,第一非零傅里叶变换项的相位正切函数为荧光寿命  $\tau$  的单值函数,与起始光强  $A$  和本底噪声  $B$  无关,可以从中计算出荧光寿命

$$\tau = \Delta t \ln \frac{\phi_1 \cos[2\pi/N - \sin(2\pi/N)]}{\phi_1}. \quad (9)$$

该方法利用快速傅里叶变换,拟合速度快,利用数字信号处理芯片技术可实现信号的实时处理。

## 6 结果与分析

我们对于研制成的端部掺  $\text{Cr}^{3+}$  的蓝宝石光纤荧光温度计的荧光温度衰减特性进行了测量。实验得到的荧光寿命与温度的关系如图 3 所示。

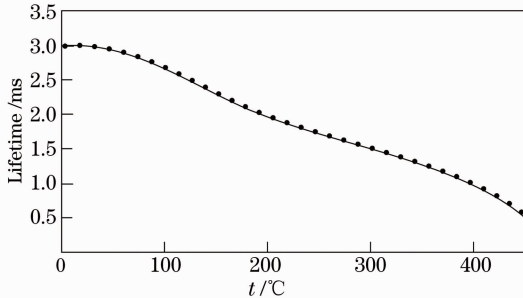


图 3 荧光寿命与温度的关系

Fig. 3 Relation of temperature and lifetime

从图 3 可看出荧光衰减寿命从 10 °C 时约 3 ms 到 450 °C 时约 0.5 ms 呈单调下降,所用信号处理系统的时间分辨率为 2  $\mu\text{s}$ 。理论上,对应的平均温度分辨率约为 0.4 °C,而实际的测温系统中,由于荧光信号中存在一定的噪声和背景信号,所测量的荧光衰减寿命分辨率为 5  $\mu\text{s}$ ,相对应的温度测量分辨率为 1 °C,随着温度的升高,荧光信号的强度减弱,而本底的热辐射信号则快速增加,从而造成了系统的信噪比随着温度的升高趋于恶化;另一方面,在高温下,由于系统测定的频率升高和荧光信号的减弱,锁定所耗时间明显增加,系统的响应变慢,而且有时锁定不稳定,甚至出现频率的不断抖动。在 400 ~ 450 °C 范围内,系统荧光衰减寿命分辨率为 10  $\mu\text{s}$ ,

对应的温度测量分辨率为 2 °C。

为了测量该系统的稳定性,把传感头置于 300 °C 的温度下测量 60 h,每隔 5 h 测量荧光衰减寿命,结果显示该系统的稳定性和重复性很好,如图 4 所示。

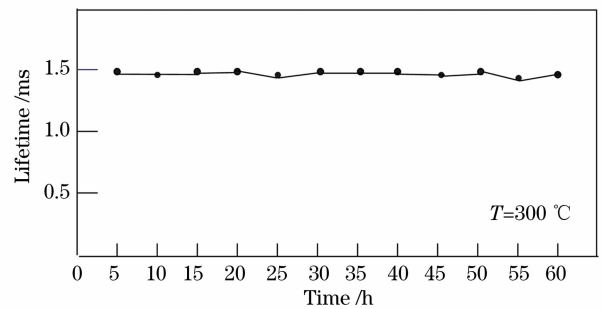


图 4 系统的稳定性和重复性测定

Fig. 4 Detection of system stability and repeatability

在 0 °C ~ 400 °C 范围内,系统的误差很小,所测的荧光寿命误差在 3  $\mu\text{s}$  以内,测量精度可以达到 0.4%;在 400 °C 以上,荧光寿命误差逐渐增大;450 °C 以上系统无法进入锁定,因此,450 °C 代表了本系统的测温上限。对系统的误差分析如图 5 所示。

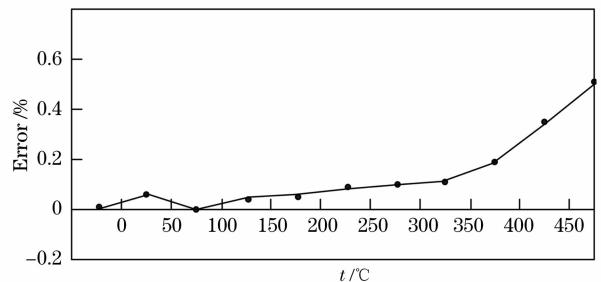


图 5 系统的误差分析

Fig. 5 Error analysis of system

由于本系统具有抗电磁干扰、测温准确、分辨率高、动态响应好等优点,可用于医疗上的微波加热治疗、变电所或大型变压器内部温度监控等常规温度传感器难以应用的场合,具有广泛的应用前景。

## 7 结论

采用 LHPG 法生长出端部掺  $\text{Cr}^{3+}$  的蓝宝石光纤荧光温度传感头,其有结构简单、耐高温的特点。利用快速傅里叶变换检测荧光寿命,实现了从室温到 450 °C 的测量。实验验证了荧光光纤温度测量系统的合理性和实用性。

## 参 考 文 献

- 1 Zhang Jinlong, Yu Chongxiu, Wang Kuiru *et al.*. Displacement sensor with temperature compensation based on chirp fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 779~782  
张锦龙, 余重秀, 王葵如等. 基于啁啾光纤光栅的温度自补偿位移传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 779~782
- 2 Zhao Yong. Principles and Application Technology of Optical Fiber Sensors[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007. 64~66  
赵 勇. 光纤传感原理与应用技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007. 64~66
- 3 J. Castrellon-Urbe, G. Paez, M. Strojnik. Radiometric analysis of a fiber optic temperature sensor[C]. *SPIE*, 2002, **4486**: 164~169
- 4 Liao Yanbiao, Li Min, Zhang Min *et al.*. Optical Fiber Sensing Techniques and Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. 31~32  
廖延彪, 黎 敏, 张 敏等. 光纤传感技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009. 31~32
- 5 Fen Ying, Huang Shihua. The analysis of sinusoidal modulated method used for measuring fluorescence lifetime[J]. *Spectrosc. Spectral Anal.*, 2007, **27**(12): 2523~2526  
冯 颖, 黄世华. 荧光寿命的正弦调制测量法及分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, **27**(12): 2523~2526
- 6 Ye Linhua, Shen Yonghang. Development of a sapphire fibre thermometer[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 1997, **16**(6): 437~442  
叶林华, 沈永行. 蓝宝石单晶光纤高温仪的研制[J]. *红外与毫米波学报*, 1997, **16**(6): 437~442
- 7 K. T. V. Grattan, Zhang Zhiyi. Fiber Optic Fluorescence Thermometry[M]. London: Chapman & Hall, 2000. 1~200
- 8 D. W. Clarke. Designing phase-locked loops for instrumentation applications[J]. *Measurement*, 2004, **32**(3): 205~227
- 9 Wei Ting, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an *et al.*. Temperature-insensitive fiber Bragg grating pressure sensing with plane round metal diaphragm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 80~84  
尉 婷, 乔学光, 贾振安等. 平面圆形膜片式光纤布拉格光栅温度补偿压强传感[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 80~84
- 10 S. A. Wade, S. F. Collin. Strain-independent temperature measurement by use of a fluorescence intensity ratio technique in optical fiber[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(18): 3050~3052